

## 压缩机用永磁同步电机转速脉动的抑制

张文娟<sup>†</sup>, 黄守道, 高 剑, 肖 磊

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 随着永磁同步电机在压缩制冷系统中的广泛应用, 如何抑制其低速范围内转速脉动成为了研究的重点. 本文从转速脉动产生的机理出发, 针对转速脉动周期性的特点, 提出了一种新的自适应控制算法. 该控制算法在传统的PI控制器上并联一个可变频率谐振控制器, 构成自适应比例谐振控制器. 从而使得参考转矩电流是由PI控制器产生的主要参考电流与谐振控制器产生的补偿电流一起构成的. 由于补偿转矩电流的作用, 使得电磁转矩能够更好地跟踪负载转矩, 以此达到对转速脉动的抑制. 最后对使用传统PI控制器和比例谐振(PI-resonance, PI-RES)控制器的两种算法进行了对比实验分析, 实验结果验证了该控制算法的有效性.

**关键词:** 制冷压缩系统; 永磁同步电动机; 转速脉动; 谐振控制器; 自适应控制

中图分类号: TM921 文献标识码: A

## Suppression of speed ripples of permanent magnetic synchronous motor for compressor application

ZHANG Wen-juan<sup>†</sup>, HUANG Shou-dao, GAO Jian, XIAO Lei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

**Abstract:** When applying the permanent magnetic synchronous motors (PMSM) to refrigerant system, the suppression of speed ripples of the PMSM in low-feed range becomes the focus of consideration. We start with the generation mechanism and the periodical characteristics of the speed ripples to propose an adaptive control algorithm. In this control algorithm, we place a frequency variable resonance controller in parallel with the conditional proportion and integral (PI) controller to form a PI-resonance (PI-RES) controller. The compensation torque current generated by the resonance controller and the main reference current generated by the PI controller constitute the reference torque current. Because of the existence of the compensation torque current, the electromagnetic torque can follow the variation of the load torque more perfectly, thus the speed ripples are suppressed. Performance indices of the conventional PI controller and the PI-RES controller are compared and evaluated through experimental investigations. The results validate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** refrigerant system; PMSM; speed ripples; resonant controller; adaptive control

### 1 引言(Introduction)

永磁同步电动机因其具有高转矩比、高功率密度、结构可靠、控制性能优良等特点, 在化工、轻纺、家电等领域的应用非常广泛<sup>[1]</sup>. 近年来, 随着压缩制冷系统对性能和效率的要求越来越高, 以永磁同步电动机取代传统的感应电机来构成压缩机的驱动系统已经成为一种趋势. 但要进一步提高整个制冷系统的效率, 还有一些问题需要解决. 其中最显著的就是永磁同步电动机在其低速范围内的转速脉动以及由此带来的低频噪声和震动问题<sup>[2]</sup>. 对于如何在低速时抑制永磁电机的转速脉动成为了当前的研究热点. 文献[3-4]用负载转矩补偿器来减小转速脉动, 因为是开

环控制, 参数的细微变化将会导致更大的转矩脉动, 所以该方法对永磁同步电动机(permanent magnetic synchronous motors, PMSM)参数的精度以及对转矩脉动的特性要求非常高. 文献[5]提出了一种在线负载转矩补偿的控制方法, 该方法的实现需要进行复杂的傅里叶变换. 文献[6-7]提出了迭代学习控制与PI控制相结合的控制方法, 但该方法的运算量非常大, 这就会由于时间延迟而引起误差. 文献[8]提出了一种重复控制和PI控制相结合的控制方案, 但由于重复控制的特点, 该方案在非周期性扰动时会产生错误信号, 因此必须先进行扰动的判断, 如何选取阈值对控制器的控制性能有很大的影响.

收稿日期: 2013-03-20; 收修改稿日期: 2013-05-28.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: zwjs0909@sina.com.

基金项目: 国家国际科技合作专项资助项目(2011DFA62240); 国家“十二五”科技支撑计划重点资助项目(2012BAZ02072); 湖南省国际科技合作专项资助项目(2011WK2012).

本文针对设计额定转速为157 rad/s, 功率6.3 kW 的永磁同步电机驱动的压缩机系统, 在对转速脉动产生的机理以及特性进行了深入的分析, 提出了一套新的控制方案, 可以实现制冷压缩机的低速平稳运行. 首先对压缩机负载转矩波形进行傅里叶分析, 发现负载转矩脉动是近似于正弦变化的周期信号, 其频率是转子角频率的2倍. 针对这一特性, 提出了基于比例谐振控制器的控制策略, 分别在传统的速度环和电流环的PI控制器上并联一个谐振控制器. 利用谐振控制器可以使与其谐振频率相同的正弦信号实现零稳态误差控制的特点<sup>[9]</sup>, 调整谐振控制器的谐振频率为转矩脉动的频率来实现对制冷压缩系统低速运行中的转速脉动进行抑制. 实验结果验证了本文所提方法的有效性.

### 2 传统PI控制(The conventional PI control)

为了建立永磁同步电动机在同步旋转坐标系下的数学模型, 首先假设: 1) 忽略电动机铁心饱和; 2) 不计电动机涡流和磁滞损耗; 3) 定子三相电流产生的空间磁势及永磁转子的磁通分布呈正弦波形. 永磁同步电动机在同步旋转坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q, \\ v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_m, \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v_d$  为  $d$  轴电压;  $v_q$  为  $q$  轴电压;  $R_s$  为定子阻抗;  $i_d, i_q$  为  $d, q$  轴电流;  $L_d, L_q$  为  $d, q$  轴电感;  $\omega_e$  为同步电角

速;  $\lambda_m$  为永磁体的磁链.

运用转子磁场定向,  $i_d = 0$  的控制方法, 得到电磁转矩的表达式:

$$T_e = \frac{3p}{2} \lambda_m i_q = k_t i_q, \quad (2)$$

式中:  $T_e$  为电动机的电磁转矩;  $p$  为电动机的极对数;  $k_t$  为转矩常数; 电动机的机械转速可以用式(3)表示:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_m} (T_e - T_L - B_m \omega_m), \quad (3)$$

式中:  $\omega_m$  为电动机的机械转速;  $J_m$  为转子惯量;  $T_L$  为负载转矩;  $B_m$  为粘性系数.

通过位置与转速的微分关系, 可以得到转子位置的表达式

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m, \quad (4)$$

式中  $\theta_m$  为转子的位置角.

传统的永磁同步电动机的控制框图如图1所示.

从控制框图可以看出, 在采用转子磁场定向矢量控制策略时, 速度环采用PI控制器得到转矩电流的指令值, 同时在同步旋转坐标系下对  $d, q$  轴电流环采用PI控制器实现励磁电流与转矩电流的解耦控制. 但传统PI控制器只能对直流信号进行无差控制, 当转矩电流中含有其他频率较高的脉动时, PI控制器不能产生有效的电流指令对其进行补偿. 要消除这些转速脉动就必须先对其产生的机理及特性进行研究, 再根据研究结果提出新的控制策略.

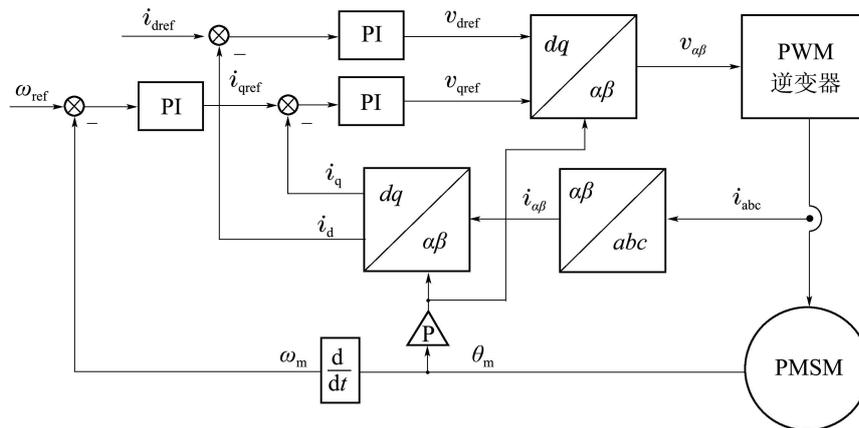


图 1 PMSM传统控制框图

Fig. 1 The conventional control diagram of PMSM

### 3 压缩机用PMSM转速脉动的特性(The characteristic of the speed ripple in PMSM for compressor application)

#### 3.1 转速脉动产生的机理(The mechanism of the speed ripple)

通常粘性系数  $B_m$  非常的小, 可以忽略不计. 电动机的转速与转矩的传递函数为

$$\omega_m(s) = \frac{\Delta T_m}{J_m s}, \quad (5)$$

其中

$$\Delta T_m = T_e - T_L. \quad (6)$$

从式(5)可以看出, 转速脉动是由  $\Delta T_m$  引起的. 在高速范围内是由于  $J_m$  对电机转速的影响比较大, 由  $\Delta T_m$  引起的转速脉动不是很大, 但在低速范围内

由于  $J_m$  对转速的影响很小, 产生的转速脉动就非常显著. 从另一方面也可以得到结论: 要抑制低速运行时的转速脉动, 最根本的问题在于要使  $\Delta T_m$  最小. 也就是说电磁转矩很好地跟踪负载转矩.

### 3.2 转速脉动的特性(The characteristic of the speed ripple)

众所周知, 压缩机的负载转矩是随着转子位置的变化而变化, 所以转矩脉动的频率是与转子的转速有关的. 为了更进一步研究两者的关系, 本文在转子转速为 62.83 rad/s 时, 对负载转矩进行了分析, 其运动轨迹见图 2.

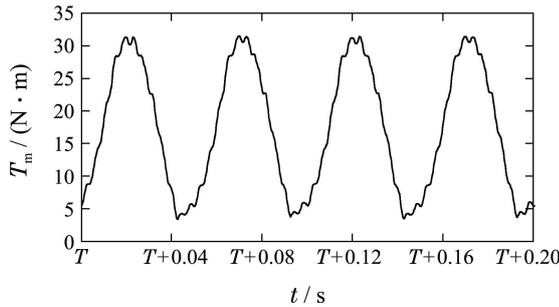


图 2 压缩机的负载转矩轨迹

Fig. 2 The compressor load trajectory

从图 2 可以看到, 随着转子位置的变化, 负载转矩成连续的近似正弦的变化.

忽略直流分量通过傅里叶分析从图 3 可以看到转子角频率为 10 Hz 时负载转矩脉动频率为 20 Hz. 即  $\Delta T_m$  的频率为 20 Hz. 由式 (5) 可知转速脉动的频率是与  $\Delta T_m$  的频率一致的, 也就是说  $\omega_m$  里面含有频率为 2 倍转子角频率的脉动成分.

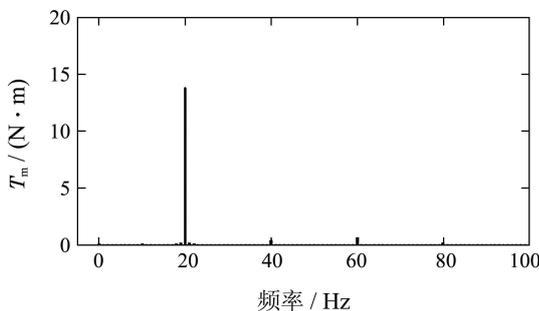


图 3 负载转矩的傅里叶分析

Fig. 3 FFT analysis of the compressor load trajectory

传统的 PI 控制的速度外环的控制框图如图 4.

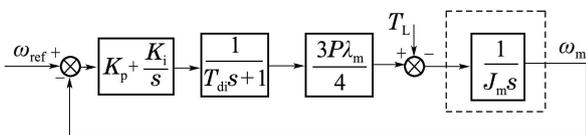


图 4 采用 PI 控制器的速度外环控制框图

Fig. 4 Control block diagram of outer speed loop by using a PI controller

图 4 中:  $K_p$ ,  $K_i$  分别是比例系数和积分系数,  $T_{di}$  是内环的时间延迟常数,  $\omega_{ref}$  是给定的参考转速, 通常是一个常数.

PI 控制器在同步旋转坐标系下, 可以对直流电信号进行有效的稳态无差控制, 对交流谐波信号难以达到理想的控制效果<sup>[9]</sup>. 这就不能实现  $\Delta T_m \approx 0$ . 从而引起转速的脉动, 其频率是转子角频率的 2 倍.

针对这一特性, 根据谐振控制器可以对其谐振频率同频的交流信号进行零稳态误差控制的特点, 在原有的 PI 控制器上并联一个谐振控制器 (resonator controller) 构成 PI-RES 控制器. 调整 RES 控制器的谐振频率为转子角频率的 2 倍, 用于对转速脉动的跟踪控制, 产生补偿转矩电流使  $\Delta T_m$  减小, 已达到抑制转速脉动的目的.

### 4 比例谐振控制器的控制策略(The control strategy using PI-RES controller)

#### 4.1 比例谐振控制器(PI-RES controller)

比例谐振控制器在  $s$  域的传递函数为

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_{ri}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2}, \tag{7}$$

式中:  $K_{ri}$  为谐振系数;  $\omega$  为谐振频率;  $\omega_c$  为截止频率.

比例积分控制器在  $s$  域的传递函数为

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}. \tag{8}$$

由式 (7)–(8) 可看出当  $G_{PR}(s)$  和  $G_{PI}(s)$  并联构成  $G_{PI-RES}(s)$  时, 只需将比例系数  $K_p$  进行调整<sup>[10]</sup>. 从而得到比例谐振控制器的传递函数

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{2K_{ri}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2}. \tag{9}$$

从上面的分析可知在原有的 PI 控制器上再并上一个谐振频率为 2 倍转子频率的谐振控制器就可以很好的抑制转速脉动. 其控制框图如图 5 所示.

从控制框图可以看出由谐振控制器产生的补偿转矩电流与有 PI 控制器产生的转矩电流一起构成了电流指令. 补偿转矩电流产生的电磁转矩用于抵消压缩机产生的负载转矩脉动. 同样为了实现对速度外环给定的交流信号的零稳态误差控制, 在电流内环同样用谐振控制器. 控制器框图如图 6.

在速度环控制器与电流环控制器加入比例谐振控制器后整个 PMSM 的控制框图如图 7 所示.

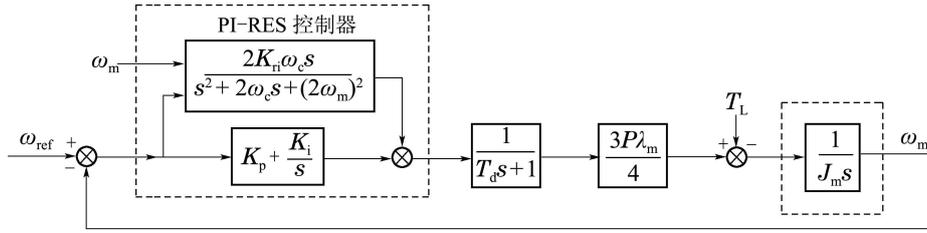


图 5 采用PI-RES控制器时的速度外环控制框图

Fig. 5 Control block diagram of outer speed loop by using a PI-RES controller

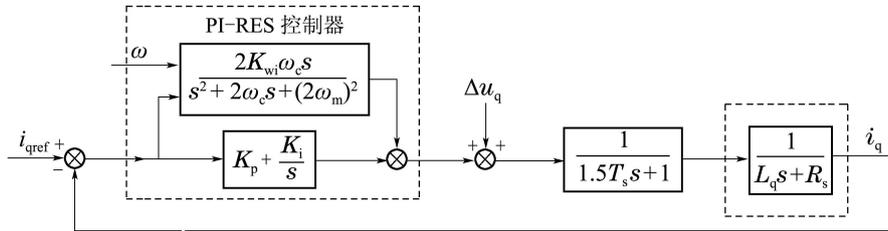


图 6 采用PI-RES控制器的电流内环控制框图

Fig. 6 Control block diagram of inner current loop by using a PI-RES controller

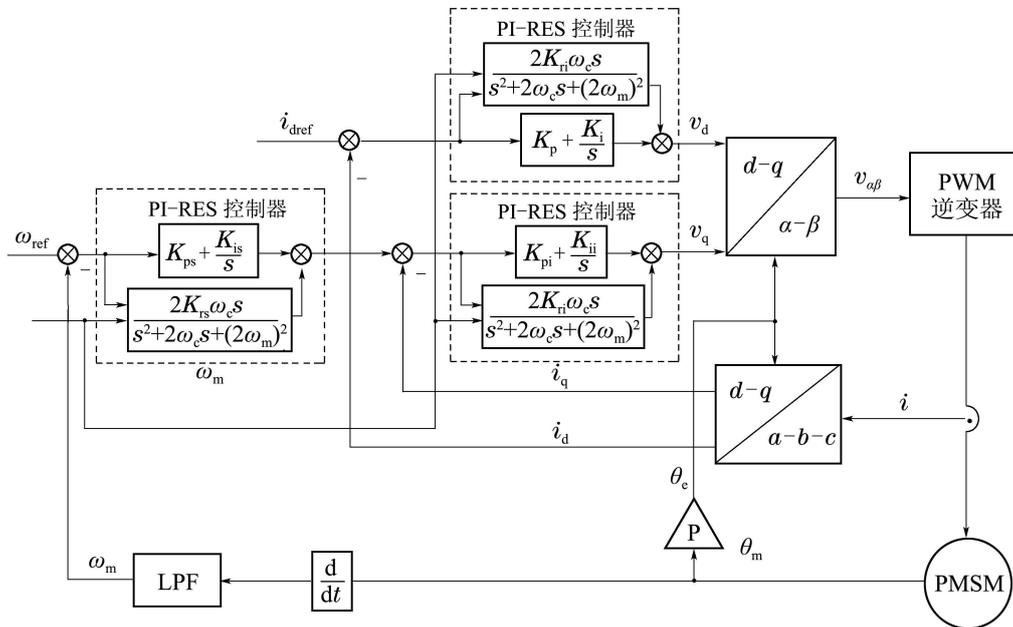


图 7 PI-RES控制策略下的PMSM控制框图

Fig. 7 Control block diagram of PI-RES control scheme of PMSM

### 4.2 PI-RES 控制器的设计(Design of PI-RES controller)

PI-RES控制器的设计主要就是PI-RES的参数设计. 首先考虑电流内环, 通过最优化的方法可以得到控制器的参数为

$$K_{pi} = \frac{L_q}{4\xi^2 T_d}, K_{ii} = \frac{K_{pi} R}{L_q}, K_{ri} = K_{ii},$$

其中:  $T_d = 1.5T_s, \xi = 0.8$ .

对于速度外环, 前面已经提过对于PI-RES控制器主要是对 $K_p$ 的调整. 所以先忽略积分和谐振环节, 整个系统就近似一个二阶系统, 其在 $s$ 域的传递函数如式(10)

$$G_s(s) = K_p s \frac{1}{J_m s} \frac{3P\lambda_m}{4} \frac{1}{T_d s + 1}, \quad (10)$$

其中 $T_d = \frac{1}{B_i} + \tau_{LPF}$ .  $B_i$ 是低通滤波器的带宽,  $\tau_{LPF}$ 是低通滤波器的时间常数.

从而可以计算出

$$K_{ps} = \frac{1}{4\zeta^2 T_d} \frac{1}{3P\lambda_m/4J_m} \quad (11)$$

考虑整个系统的稳定性, 根据文献[11]得出其他参数  $K_{ps} = 3.27$ ,  $K_{is} = K_{rs} = 5$ . 并且根据实验的需要, 在  $18.85 \text{ rad/s}$ ,  $52.36 \text{ rad/s}$ ,  $157 \text{ rad/s}$  分别测出了电流内环和速度外环的波特图, 从图8-9中可以看出系统稳定并且可以快速跟踪给定指令.

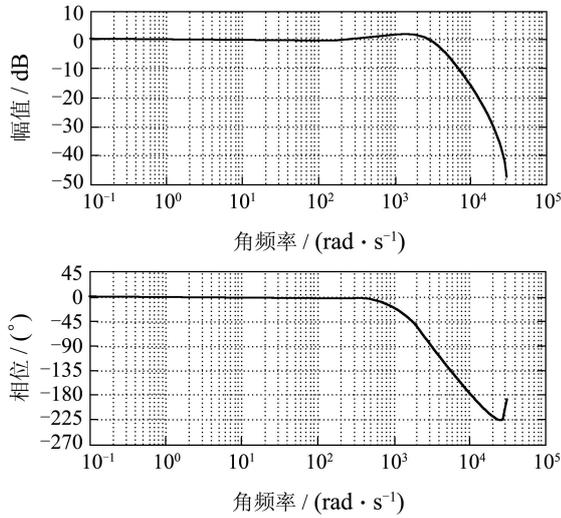


图8 电流环波特图

Fig. 8 Bode diagram of current loop

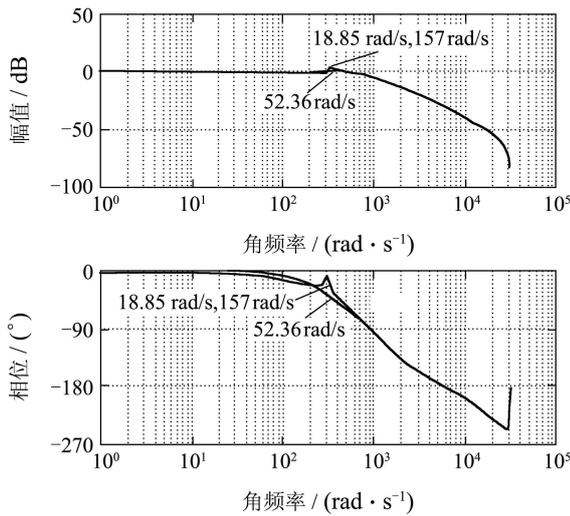


图9 速度环波特图

Fig. 9 Close-loop Bode diagram of speed loop

### 5 对比实验(The comparison experiment)

为了更有效的验证引入自适应比例谐振控制器后采用PMSM压缩机控制系统的有效性, 进一步进行了实验测试, 并且与传统的PI控制器进行对比, 实验系统见图10. 整个实验平台包括永磁同步电动机、压缩机负载、eZdspTM-F28335控制器、Fc302逆变器以及编码器, 其中电动机参数如表1.

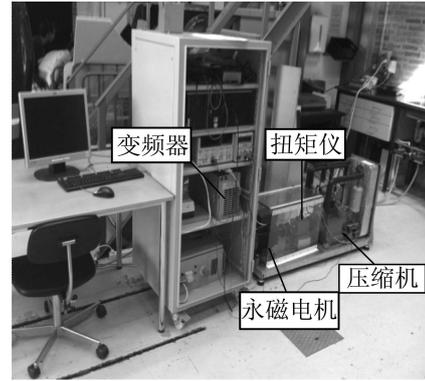


图10 实验系统照片

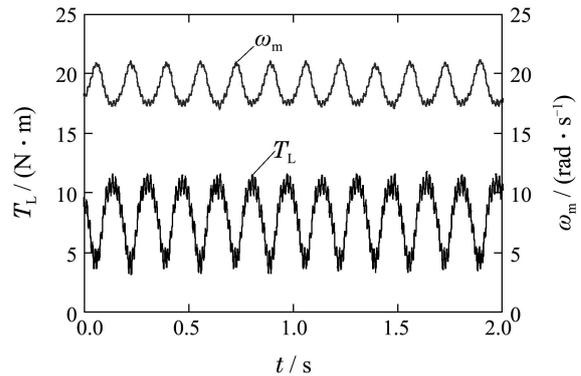
Fig. 10 The photo of the experiment system

表1 永磁同步电动机参数

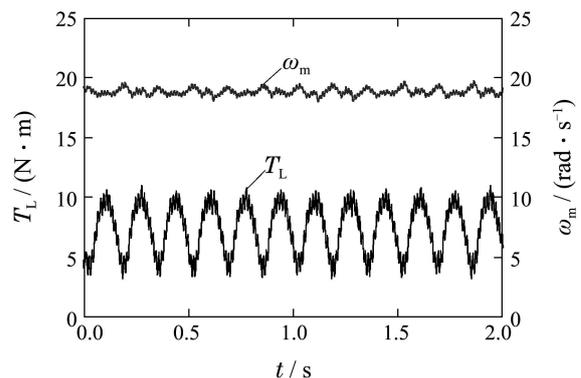
Table 1 Parameters of tested PMSM

转动惯量	0.0116 kg·m <sup>2</sup>
定子电阻	0.78 Ω
d轴电感	10 mH
q轴电感	12.8 mH
额定转矩	38 N·m
永磁体磁链	0.412 Wb
极对数	4

为了更系统地分析2种控制算法的控制性能, 分别在转速为  $18.85 \text{ rad/s}$  (低速),  $52.36 \text{ rad/s}$  (中高速) 和  $157 \text{ rad/s}$  (额定转速) 做了对比试验, 试验波形如图11.



(a)  $\omega_m = 18.85 \text{ rad/s}$  (PI)



(b)  $\omega_m = 18.85 \text{ rad/s}$  (PI-RES)

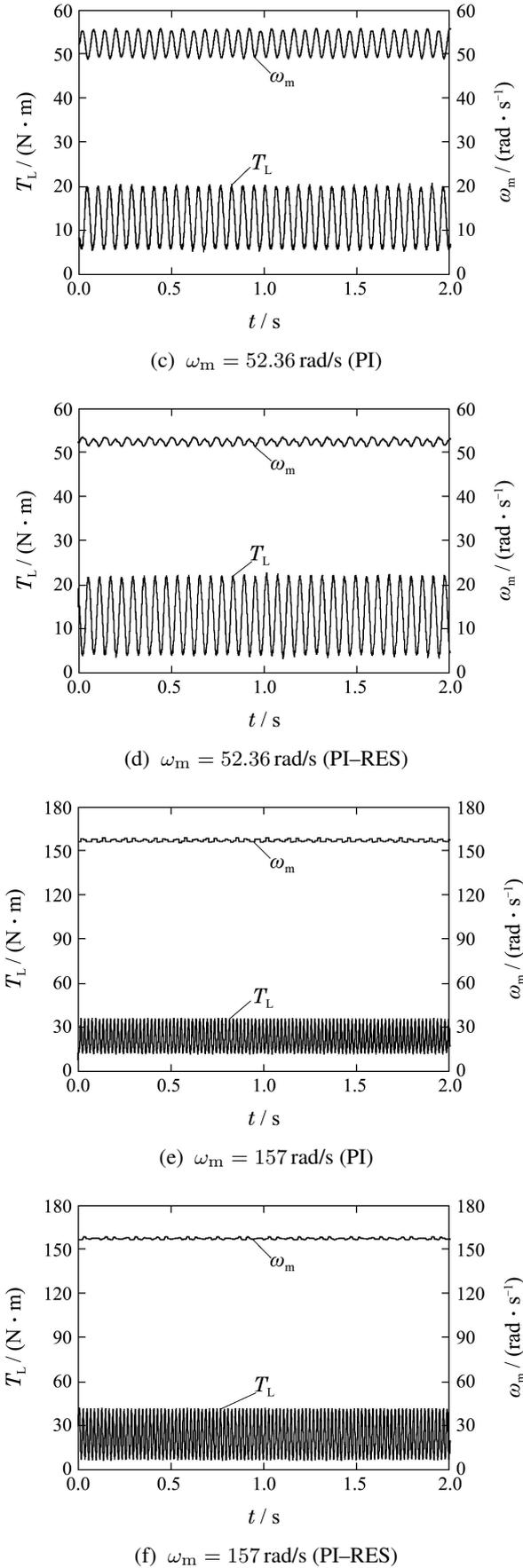


图 11 2种控制策略下的转速波形对比

Fig. 11 The comparison of the speed waves between the two control method

从图11(a)可以看出当PMSM运行在180 r/min低速范围时, 采用传统的PI控制时存在很大的转速脉动. 而与图11(b)相比发现在采用了新的PI-RES控制器后, 转速脉动有了很大程度的改善. 这是因为在采用了新的控制算法后, 由于谐振控制器能够对转速中频率为2倍转子角频率的脉动部分进行很好的调节作用. 由谐振控制器产生的补偿转矩电流信号再通过电流内环的作用产生了相应的用于抵消负载转矩脉动的电磁转矩. 也就是说在采用了新的控制算法后电磁转矩能很好地跟踪周期变化的负载转矩, 从而使产生转速脉动的 $\Delta T_m \approx 0$ 达到了抑制转速脉动的目的. 从图11(c)–(f)可以看出当PMSM运行在中速、额定转速时, 由于转动惯量的缘故,  $\Delta T_m$ 对转速的影响较小, 2种控制策略都能够得到比较平稳的转速. 在不同转速下的实验结果充分证明了前面理论分析的正确性.

为了更完备验证新策略的有效性和可行性, 对2种控制策略下电机的动态性能也做了对比分析(如图12).

图12–13表示PMSM分别在2种控制策略下转速从0 rad/s加速到额定转速时的三相电流和转速的波形. 从两图的对比可以看出在增加了谐振控制器后系统的动态性能并没有受到影响.

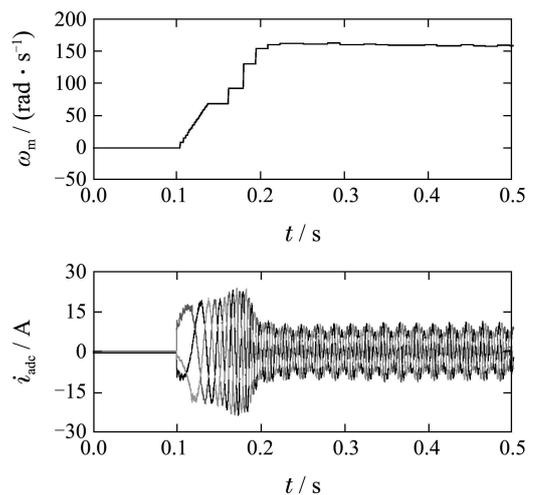
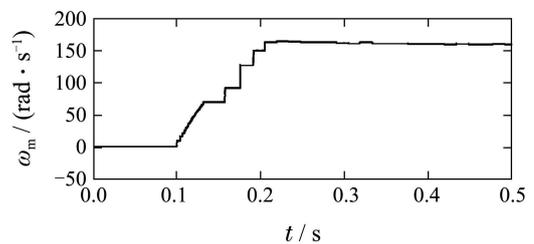


图 12 PI控制策略下的系统动态特性

Fig. 12 The dynamic performance by using PI control method



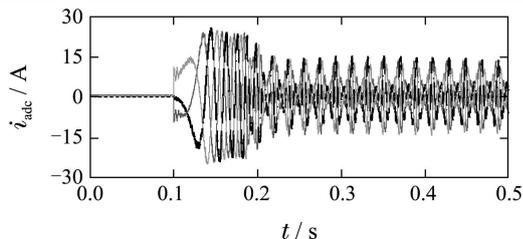


图 13 PI-RES控制策略下的系统动态特性

Fig. 13 The dynamic performance by using PI-RES control method

## 6 结论(Conclusions)

本文根据压缩机用永磁同步电机低速时转速脉动的特性,提出了一种新的基于自适应比例谐振控制器的压缩机转速脉动抑制策略.为了验证该方法的有效性和可行性,搭建了实验平台,并且分别在低速、中速、高速时对2种控制策略进行了对比实验.实验结果证明该控制策略能够有效地抑制永磁同步电动机的转速脉动.对进一步研究如何提高制冷压缩系统的效率有一定的意义.

## 参考文献(References):

- [1] SHI J L, LIU T H, CHANG Y C. Position control of an interior permanent-magnet synchronous motor without using a shaft position sensor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(4): 1989 – 2000.
- [2] 张猛, 李永东, 赵铁夫, 等. 一种减小变频空调压缩机低速范围内转速脉动的方法 [J]. *电工技术学报*, 2006, 21(7): 99 – 104. (ZHANG Meng, LI Yongdong, ZHAO Tiefu, et al. A new method to reduce the periodic speed ripple of air-conditioners in low speed range [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(7): 99 – 104).
- [3] HUNG J Y, DING Z. Design of currents to reduce torque ripple in brushless permanent magnet motors [J]. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, 1993, 140(4): 260 – 266.
- [4] HANSELMAN D C. Minimum torque ripple maximum efficiency excitation of brushless permanent magnet motors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1994, 41(3): 292 – 300.
- [5] GU B G, CHOI J H, JUNG I S. Online load torque compensator for single rolling piston compressor [C] // *The 8th IEEE Conference on Power Electronics and ECCE Asia*. Jeju, South Korea: IEEE, 2011: 2720 – 2724.
- [6] QIAN W Z, PANDA S K, XU J X. Speed ripple minimization in PM synchronous motor using iterative learning control [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20(1): 53 – 61.
- [7] 李鸿儒, 顾树生. 基于神经网络的PMSM自适应滑模控制 [J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(3): 461 – 464. (LI Hongru, GU Shusheng. Neural-net work-based adaptive sliding mode control for PMSM [J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(3): 461 – 464.)
- [8] 储剑波, 胡育文, 黄文新, 等. 一种抑制永磁同步电机转速脉动的方法 [J]. *电工技术学报*, 2009, 24(12): 43 – 49. (CHU Jianbo, HU Yuwen, HUANG Wenxin, et al. Suppressing speed ripples of permanent magnetic synchronous motor based on a method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(12): 43 – 49.)
- [9] 杨秋霞, 梁雄国, 郭小强, 等. 准谐振控制器在有源电力滤波器中的应用 [J]. *电工技术学报*, 2009, 24(7): 171 – 176. (YANG Qiuxia, LIANG Xionguo, GUO Xiaoqiang, et al. Application of quasi resonant controller for active power filter [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(7): 171 – 176.)
- [10] YEPES A G, FREIJEDO F D, LOPEZ O. High-performance digital resonant controllers implemented with two integrators [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(2): 563 – 576.
- [11] LEONHARD W. *Control of Electrical Drives* [M]. 3th Edition. Berlin: Springer, 2001.

## 作者简介:

张文娟 (1986-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: zwjs0909@sina.com;

黄守道 (1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制, E-mail: hsd1962@hnu.edu.cn;

高剑 (1979-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电机设计, E-mail: gj\_2520596@sina.com;

肖磊 (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为电机控制, E-mail: china\_xiaolei@163.com.